

文章编号: 1003-1375(2011)04-0027-07

新丰江水库地震序列的分段研究

万永芳, 杨马陵

(广东省地震局, 广州 510070)

摘要:从新丰江水库地震序列分段、地震序列参数统计、地震序列分段与库水位关系等方面探讨新丰江地区的地震特征。结果表明:①水库地震全序列低 b 值 (≤ 0.9) 时段与大区域地震活动的增强存在一定的相关性, 余震活动在一定程度上具有华南地区地震活动“窗口”的作用。②水库地震晚期余震释放阶段 55 个 $M_L \geq 3.5$ 级地震分序列研究显示, 1975 年以来的各分序列 b 值明显低于之前, 平均值仅为 0.66; 分序列类型 60% 以上属于主余型; 78% 的分序列最大余震发生在主震后 2 天内, 94% 发生在主震后 10 天内。③1964 年 5.3 级强余震后该区地震活动的增强与库水位的上升没有明显的线性关系, 且晚期余震释放阶段 $M_L \geq 4.0$ 级地震 73% 发生在库水位下降或由下降转为平稳波动的过程中, 库水卸载阶段的地震活动更值得关注。

关键词:新丰江; 地震序列; 序列统计特征; 库水位

中图分类号: P315.5 文献标志码: A

0 引言

新丰江水库位于广东省河源市境内的东江支流新丰江上, 坝高 105 m, 控制流域面积 5 740 km², 总库容 139.8 × 10⁸ m³。1959 年 10 月新丰江水库截流蓄水后, 开始出现有感地震活动, 1962 年 3 月 19 日库区发生 6.1 级地震(以下简称主震), 该地震是目前世界上 4 个 6.0 级以上水库诱发地震之一(注: 本文中震级前未标注 M_L 的均指 M_S 震级)。

自水库诱发地震以来, 新丰江地区一直是广东省地震活动水平比较高的地区之一。主震后, 仅发生 2 次大于 5.0 级余震, 但小于 4 级的地震活动则长期持续不断, 可定位的 0 级以上地震近 6 万次。日常地震监视预报及震情应急大量面临的是对中小有感地震的快速处置、序列性质的判定以及后续活动趋势的估计。了解和掌握新丰江水库坝区及其周围地区的地震活动特征, 对评估该区域的地震危险性, 预测可能的地震活动有较大作用。

1 地质构造环境

新丰江水库主要位于燕山期花岗岩岩基之上, 该岩体规模巨大, 呈北东东向延伸, 长达数百公里。区内地质构造复杂, 既有褶皱, 又有断裂, 还有多期岩浆活动, 从地层分布看可分为 3 个区: 北部沉积岩

区、中部花岗岩区、南部沉积岩区, 以燕山期侵入花岗岩的新丰江岩体分布最广^[1]。新丰江库区的断裂构造十分发育, 主要断裂有 3 组, 其基本走向分别为 NE、NW 和 NEE 向(图 1)。规模较大的 NE 向断裂

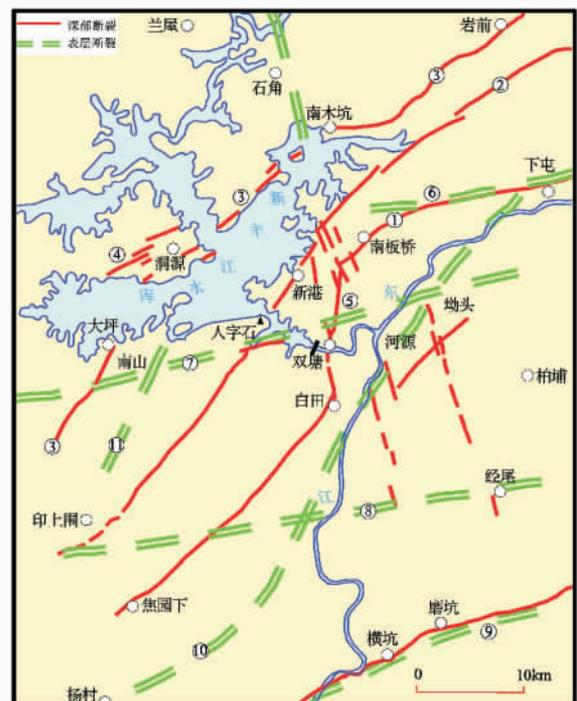


图 1 新丰江水库断裂示意图

收稿日期: 2011-03-22

基金项目: 国家科技支撑计划专题(2008BAC38B03-01)

作者简介: 万永芳(1973-), 女, 江西南昌人, 高级工程师, 主要从事地下流体力学和地震预测等研究。E-mail: wyf86586@163.com

有:河源断裂、人字石断裂和大坪—岩前断裂;最主要的 NW 向断层为石角—新港—白田断裂带;库区 NEE 向深部构造大致可划分为洞源—下屯构造带和南山—坳头构造带 2 条主要的断裂构造带^[1]。

新丰江地区的水文地质结构是散状导水断层和中等渗透危险性岩体的组合形式。断层力学性质方面,NE 向断层为易于形成阻水构造的逆断层和逆掩断层,NW 向断层为易于形成导水构造的张扭性走滑断层。断层岩方面,NE 向断层核部为胶结完好、不透水的硅质岩和糜棱岩,而 NW 向断层多以小规模平移断层和张节理出现。6.1 级主震发震构造不是本区最为发育的 NE 向断裂,而是规模有限、断续分布的 NW 向断裂,断层的渗透结构是形成诱发地震条件的重要因素^[2]。

2 地震序列分段

数十年来新丰江地区地震的分布没有显著的变化,主要密集于水库的峡谷区。本文研究区间主要限定在 $23.50^{\circ}\sim 24.04^{\circ}\text{N}$ 、 $114.25^{\circ}\sim 114.84^{\circ}\text{E}$ 区域。

2.1 全序列分段

新丰江水库诱发地震属于典型的前震—主震—余震型地震序列。以前震极其丰富为特点,前震最大震级为 1960 年 7 月 18 日 $M_L 4.3$ 级;余震活动以低速度衰减,时强时弱,活动时间持续至今,整个活动期近 50 年。对地震全序列特征分析认为,大致可分为 4 个阶段^[1,3-4]:①前震阶段,1959 年 10 月截流蓄水后至 1962 年 3 月 19 日主震前;②主要释放阶段,1962 年 3 月 19 日主震后至 1964 年 9 月 23 日最大余震 5.3 级地震发生为止;③余震释放阶段,1964 年 9 月 23 日最大余震 5.3 级地震后至 1969 年;④晚期余震释放阶段,1970 年至今。

根据序列 $N-M$ 图获得有效震级下限为 $M_L 2.0$ 级,取震级差为 0.1,采用线性最小二乘法分段计算 $M_L 2.0$ 级以上地震序列的 b 值(表 1),结果表明,各序列分段 b 值都大于 1,余震释放阶段的 b 值最高,前震阶段的 b 值次之,晚期余震释放阶段的 b 值最低,这些值为一般构造地震 b 值(0.72)的 1.4~1.6 倍,也高于同区天然地震的 b 值(例如,广东阳江震区 b 值为 0.86)。

表 1 全序列分段 b 值计算结果

序列分段	序列计算时间段	b 值
前震阶段	1961.07.08~1962.03.19(不包括 6.1 级)	1.21
主要释放阶段	1962.03.19~1964.09.23(不包括 6.1 级和 5.3 级)	1.14
余震释放阶段	1964.09.23~1969.12.31(不包括 5.3 级)	1.31
晚期余震释放阶段	1970.01.01~2009.12.31	1.01

采用最大似然法计算长时间尺度的 b 值(时间扫描的窗长、步长均选为 1 年),其变化特征显示(图 2),主震前 b 值存在一个下降过程;主震后至最大余震 1969 年 5.3 级地震前 b 值呈上升势态;之后转为缓慢下降,1987 年达到最低值 0.51;1988 年再度转折,表现为波浪式上升,2005 年达到最高值。参考同区天然地震的 b 值,以 0.9 为阈值,小于 0.9 认为属于低 b 值。共提取到 12 个年份 b 值 ≤ 0.9 ,即 1962、1963、1976—1977、1981、1984、1986—1989、1992、1997 年。研究发现,低 b 值时间段或其前后 1~2 年新丰江地区地震活动明显增强。其中,1962 发生 6.1 级主震;1963 年强余震活跃;晚期余震释放阶段 1975、1977、1981、1987、1989、1991、1999 年都有 $M_L 4.7$ 级以上地震发生,这也涵盖了 1970 年以来本区发生的全部 $M_L 4.7$ 级以上地震。

1970 年以来本区外围的大区域地震活动经历了几次活跃时段:1976 年是上世纪后半叶中国陆区地震活动最强的年份;1986—1987 年广东阳江、江西寻乌均发生 5.0 级以上地震;1994—1995 年台湾海峡和北部湾分别发生 7.3 级和 6.1 级、6.2 级地震。分析表明,新丰江地区低 b 值时间段与大区域地震活动的增强存在一定对应关系,时间上基本吻合,前后误差一般不超过 2 年。

2.2 晚期余震释放阶段分序列分析

1970 年至今,新丰江水库的地震活动处于晚期余震释放阶段。此段时间区域台网密度较高,有效震级下限达到 $M_L 1.0$ 级。选择区域内 1970—2009 年(累计 40 年)发生的 71 次 $M_L 3.5$ 级以上地震作为研究对象,共获得 55 个分序列样本。

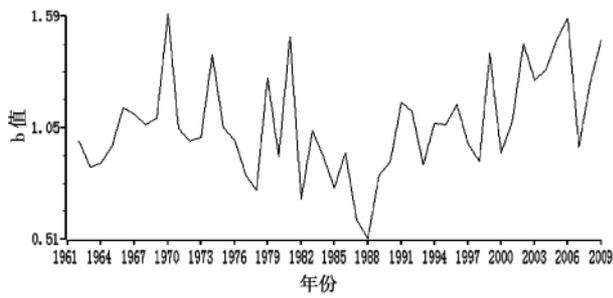


图2 b值变化曲线图

根据地震活动特点,延续以往基于震级差的序列分类思路^[5-7],将序列按地震类型划分为主余型(包括有前震主余型和无前震主余型)、多震型和孤

立型3类序列,以序列主震 M_0 与3个月内最大余震 M_1 之间的震级差 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列类型划分,划分标准为:①孤立型: $\Delta M \geq 2.5$ 且余震次数较少;②主余型: $0.6 \leq \Delta M \leq 2.4$;③多震型(包含“双震型”及“震群型”序列): $\Delta M < 0.6$ 。

2.2.1 分序列类型信息分析

按震级区间归纳分序列类型统计特征(表2),当分序列主震 $3.9 \geq M_0 (M_L) \geq 3.5$ 时,主余型、多震型和孤立型分别占58%、32%及10%;当分序列主震 $4.9 \geq M_0 (M_L) \geq 4.0$ 时,主余型、多震型和孤立型分别占69%、8%及23%。随分序列主震震级的提高,主余型所占比例提高,且无前震主余型在主余型中所占的比例增加。

表2 地震类型统计

分序列主震 $M_0 (M_L)$	地震类型				分序列个数
	主余型		多震型	孤立型	
	有前震主余型	无前震主余型			
≥ 5.0	0	0	0	1	1
4.0~4.9	3	6	1	3	13
3.5~3.9	13	11	13	4	41

按时间段统计发现,1976年之前,地震分序列主余型所占比例高达81%,其中有前震主余型占主余型的比例为59%,且没有孤立型地震序列。

1976—2009年,地震分序列类型与时间进程无明显关联,具有一定的随机性,主余型、多震型和孤立型所占比例分别为47%、29%和24%(表3)。

表3 按时间段统计地震分序列类型

时间段	序列类型				分序列个数
	主余型		多震型	孤立型	
	有前震主余型	无前震主余型			
1970—1975年	10	7	4	0	21
1976—2009年	6	10	10	8	34

从相同震级区间、不同类型序列所占的比例来看(表4),当分序列主震震级大于 $M_L 4.5$ 级时,主余型所占比例大幅增加达87%,多震型所占比例减少(表中主余型第2列与多震型第2列S);从类型相

同但震级区间不同的序列所占比例来看,50%的孤立型序列的主震小于 $M_L 4.0$ 级(表中孤立型第3列T), $M_L 3.5 \sim 3.9$ 震级区间多震型序列所占比例高达93%(表中多震型第3列T)。

表4 不同震级范围内的序列分布及相关统计

$M_0 (M_L)$	主余型			多震型			孤立型			Σ_1
	N	S/(%)	T/(%)	N	S/(%)	T/(%)	N	S/(%)	T/(%)	
≥ 5.0	0	0	0	0	0	0	1	100	13	1
4.6~4.9	7	87	21	1	13	7	0	0	0	8
4.0~4.5	2	40	6	0	0	0	3	60	37	5
3.5~3.9	24	58	73	13	32	93	4	10	50	41
Σ_2		33			14			8		

注: M_0 为序列主震震级;N为相同类型、不同震级区间的序列数目; Σ_1 为相同震级区间、不同类型总的序列数目; Σ_2 为相同类型、不同震级区间总的序列数目;S为相同震级区间内不同类型序列所占的比例(N/Σ_1);T为相同类型、不同震级区间序列所占的比例(N/Σ_2)。

各类型序列余震的特征(表 5)分析显示,主余型、多震型和孤立型分序列中,最大余震发生在 2 天内所占的比例分别为 82%、64%和 87%;余震(含前震)活动持续时间在 10 天内所占的比例分别为 79%、64%和 87%^[8]。

震)活动持续时间在 10 天内所占的比例分别为 79%,72%和 87%^[8]。

表 5 各分序列余震的相关统计

时间	主余型	多震型	孤立型
最大余震(或前震)发生时间	82%,2 天内 15%,3~10 天内 3%,11~30 天内	64%,2 天内 22%,3~10 天内 14%,11~30 天内	87%,2 天内 13%,3~10 天内
余震(含前震)活动持续时间	79%,10 天内 21%,11~30 天内	72%,10 天内 14%,11~30 天内 14%,31~60 天内	87%,10 天内 13%,11~30 天内
分序列个数	33	14	8

2.2.2 分序列 b 值、k 值分析

本文进行地震参数计算的分序列类型为主余型和多震型,孤立型不列入其中。

整体而言,分序列样本的 b 值平均值为 0.79。分序列的最大地震发震时间与 b 值的关系显示(图 3),随着时间的推移,b 值存在趋势下降变化,且

1975 年之前 b 值相对较高,平均值达 0.96,而之后平均值仅为 0.66。分序列的地震类型与 b 值对比表明(图 4),有前震主余型序列、无前震主余型序列、多震型序列的 b 值平均值分别为 0.96、0.79、0.61,多震型的 b 值最小。

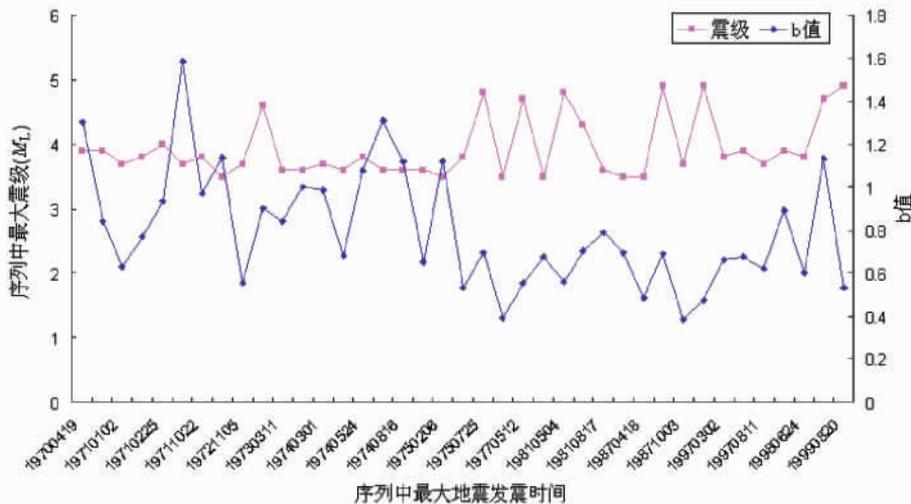


图 3 地震分序列 b 值与发震时间的关系

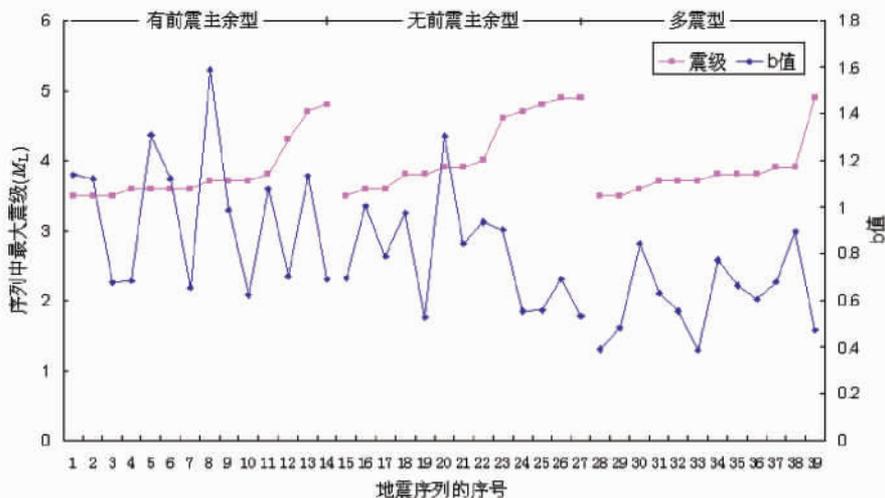


图 4 地震分序列 b 值与地震类型的关系

对新丰江水库分序列 k 值计算显示(图 5), k 值小于 0.2 为主余型, k 值大于 0.3 为多震型。

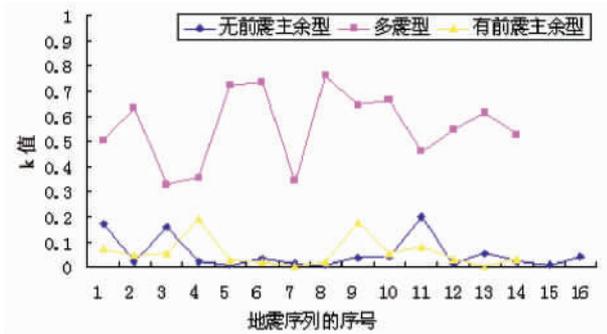


图 5 地震分序列 k 值与地震类型的关系

3 地震序列活动与库水位关系

新丰江水库蓄水改变了水库所在地区的地震活

动性,蓄水前,新丰江地区的地震频度和强度都很低;蓄水后,该区地震频度和强度大大超过历史地震活动水平,地震活动的范围也随着水位的升高而不断扩大,震源深度亦不断加深。1 500 年以来该区有记载的 3 次 5.0 级以上地震,均为水库蓄水后诱发的地震^[1]。

3.1 库水与地震活动的关系

新丰江水库诱发地震序列与库水加卸载关系显示,蓄水初期,库区地震活动随着库水位增高逐步增强,随水位降低而减弱,经过高水位之后发生 6.1 级主震。主震震前相关性好,之后相关性转弱(图 6)。6.1 级主震和 2 次 5.0 级以上强余震都发生在高水位阶段。主震 3 年后地震活动与水库水位的对应关系已不明显。

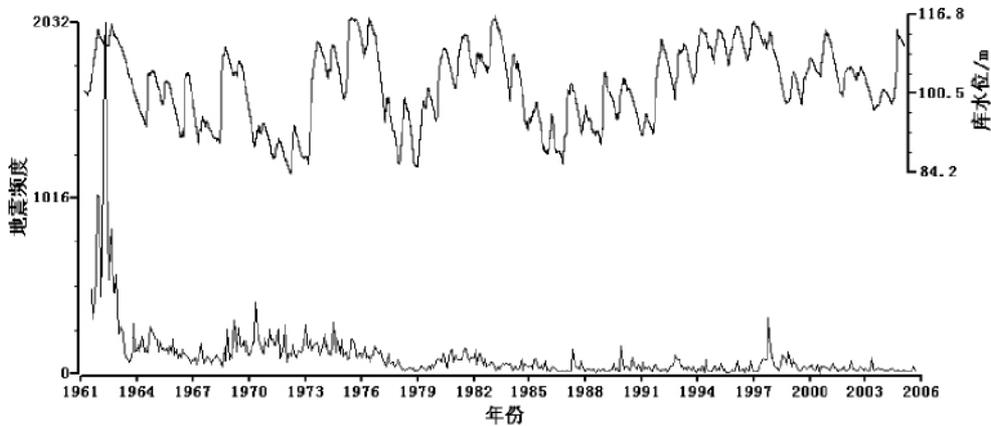


图 6 库水位变化与地震频度关系对比图

其中,前震阶段和主要释放阶段大部分 $M_L \geq 4.0$ 级以上地震都发生在高水位阶段,而之后这种规律已不存在,反映蓄水数年后库区积累的能量由于地震活动的不断释放而达到新的平衡;余震释放阶段共发生 12 次 $M_L \geq 4.0$ 级地震,其中 7 次(约 58%)发生在库水水位下降或由下降转为平稳波动

的过程中;晚期余震释放阶段共发生 15 次 $M_L \geq 4.0$ 级地震,其中 11 次(约 73%)发生在库水水位下降或由下降转为平稳波动的过程中(图 7)。库水卸载阶段地震活动增强,可能是由于过剩孔隙压力造成瞬时破裂引起的,由此可见,库水卸载阶段的地震活动更值得关注。

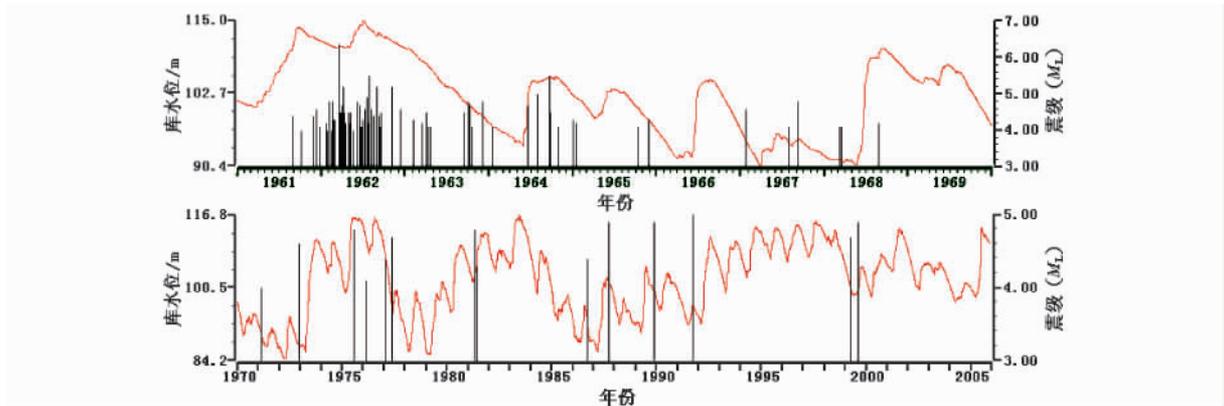


图 7 库水位变化与 $M_L 4.0$ 级以上地震对比图

龚钢延和谢原定用前震的震中分布面积折算水的扩散率时指出,水的渗透作用在蓄水的最初5年内达到最大^[9]。1970年以来震源深度显示基本没有变化,表明岩体的围压随深度加大而增大,水的渗透速度也随深度加大而变慢,并且最终止于一定深度。

3.2 库水与地震危险性研究

1964年5.3级强余震后库坝区地震频度、强度逐渐减弱,与库水的加卸载关系弱化,库区水文地质环境、水库应力进入新的平衡状态,诱发强地震的概率降低。

分析表明,6.1级主震后,库水诱发地震不存在某一水位阈值;现阶段,较强地震的发生与高水位基本无关。例如,1965年后库水位多次出现高水位时段,但几次泄洪后并没有诱发中强地震(表6)。再如,2005年6月,河源市连降暴雨,库水位迅速攀升

表6 新丰江水库泄洪统计表

年份	溢洪天数/天	溢洪水量/亿立方米
1975	25	5.800
1976	5	3.191
1983	16	12.521
1997	12	4.467
2006	2	0.273

达到112.65m的高水位,离113m的水位警戒线只差0.35m,库水位的快速上升,对该区应力造成一定的影响,引起小震活动增强,但未诱发较大地震。然而,水位的急剧上升与急剧下降仍需关注,特别是急剧下降,例如新丰江水库1977年的 $M_L 4.7$ 级地震发生在水位急剧下降期。

4 结论与讨论

新丰江水库晚期余震释放阶段的地震活动除与

水库地震的缓慢衰减有关外,还与大区域范围的地震活动强弱变化有关。地震全序列 b 值时间扫描显示,低 b 值(≤ 0.9)与大区域地震活动的增强存在一定的相关性,新丰江水库余震活动在一定程度上具有华南地区地震活动“窗口”的作用。

晚期余震释放阶段55个分序列研究结果表明:序列类型空间分布具有一定的区域特征,该区中小地震类型60%以上属于主余型;1976年之前,地震分序列主余型所占比例高达81%;1976年之后,地震分序列主余型、多震型和孤立型所占比例分别为47%、29%和24%。随分序列主震震级的增加,主余型所占比例增加,多震型所占比例减少。绝大多数分序列的最大余震发生在震后30天内,78%的分序列最大余震发生在主震后2天内,94%发生在主震后10天内。对主余型序列而言,当主震震级较高时,最大余震与主震间时间间隔相对略长,且余震持续的活动时间也较长;主震震级较低时,最大余震与主震间时间间隔相对略短,且余震持续的活动时间也较短。1975年以来的各分序列 b 值明显低于之前,平均值仅为0.66,与一般构造地震 b 值(0.72)接近。分序列,可用 k 值区分其分序列的类型。

水库蓄水的最初5年,库水位的高低变化与地震频度、能量释放的强弱呈现较好的正相关性。1964年5.3级余震后该区地震活动的增强与库水位的上升没有明显的线性关系,并且 $M_L \geq 4.0$ 级地震67%发生在库水位下降或由下降转为平稳波动的过程中,其中,晚期余震释放阶段 $M_L \geq 4.0$ 级以上地震发生于库水卸载阶段的比例高于余震释放阶段。库水卸载阶段的地震活动更需要关注,库水位的剧烈上升或下降是引起库区地壳应力场根本性变化的可能因素之一,因此在人工操作增加库容或泄洪的过程中应避免使库水位变化过快过急。

参考文献:

- [1] 丁原章,常宝琦,肖安予,等. 水库诱发地震[M]. 北京:地震出版社,1989,89-93.
- [2] 易立新,王广才,李榴芬. 水文地质结构与水库诱发地震[J]. 水文地质工程地质,2004(2):29-32.
- [3] 魏柏林,冯绚敏,陈定国,等. 东南沿海地震活动特征[M]. 地震出版社,2001,154-162.
- [4] 杨马陵,叶东华,叶秀薇,等. 新丰江水库诱发地震研究报告[R]. “新丰江水电站大坝第三轮定检”资料之五. 27-35.
- [5] 蒋海昆,曲延军,李永莉,等. 中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征[J]. 地球物理学报,2006,49(4):1110-1117.
- [6] 周翠英,蒋海昆,周焕鹏,等. 华东中强震的构造分类及地震活动图像中、短期异常特征[J]. 地震,2004,24(4):87-96.
- [7] 中国地震局. 地震现场工作大纲和技术指南[M]. 北京:地震出版社,1998:25-26.
- [8] 万永芳,叶东华,陈大庆. 广东新丰江地区地震研究[J]. 华南地震,2008,28(2):59-66.
- [9] 龚钢延,谢原定. 新丰江水库地震区内孔隙流体扩散与原水力扩散率的研究[J]. 地震学报,1991,13(3):364-371.

Statistic Characteristics of Xinfengjiang Reservoir Earthquake Sequence

WAN Yong-fang, YANG Ma-ling

(Seismological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The seismic activity characteristics of Xinfengjiang reservoir earthquake sequence and the relationship between them and the water level changes of the Xinfengjiang reservoir are studied in this paper. The result shows that the low b value period of the earthquake sequence is related to the enhancing of regional seismic activity and to some extent, the earthquake sequence can be seen as a seismic activity window of Southern China. Studies of 55 earthquake subsequences with main shock of $M_L \geq 3.5$ indicate that the b value of the subsequence after 1975 are distinctively lower than that of the before, 60 percents of the earthquake subsequences belongs to mainshock-aftershock type, the biggest aftershocks of 78 percents of the earthquake subsequences occur with 2 days after the main shock. There is no distinctive linear relation between the enhancing of seismic activity and water level rising of Xinfengjiang reservoir, instead, 73 percents of the $M_L \geq 4.0$ earthquakes occurs during the unloading period of Xinfengjiang reservoir.

Key words: Xinfengjiang; earthquake sequence; sequence statistic characteristic; reservoir water level

欢迎订阅《华北地震科学》

《华北地震科学》是由河北省地震局主办的地震科学综合性学术刊物,国内公开发行。主要刊登地震学方面具有创新性的研究成果,也登载地球物理、地震地质、地震工程等方面的学术论文及国内外地震科学研究的最新进展和成果。

《华北地震科学》均为季刊,每季末出版,每年 4 期,每期定价 15 元,全年定价为 60 元(含邮寄费)。2012 年继续由编辑部直接发行。凡欲订本刊的读者可通过全国非邮发报刊联合发行部或与本刊编辑部联系均可。

(1) 全国非邮发报刊联合征订服务部

邮 编: 300381

地 址: 天津市卫津南路李七庄邮局 9801 信箱全国非邮发报刊联合征订服务部

电 话: 022-23973378, 23962479

电子邮件: LHZD@public.tpt.tj.cn

(2) 本刊编辑部

邮 编: 050022

地 址: 石家庄市槐中路 262 号河北省地震局《华北地震科学》编辑部

电 话: 0311-85814313

电子邮件: he3g@eq-he.ac.cn